



## ESTUDIO DE DIFERENTES MATERIALES DE CUBIERTA PARA COCINAS SOLARES TIPO CAJA.

A. Lema, M. Pontin, M. Ghirardotto, A. Sanmartino.  
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería  
Ruta Nacional 36 Km. 601, (5800) Río Cuarto – Córdoba, Argentina  
Tel. +54 (358) 467 6488 - Fax +54 (358) 467 6246 . E-mail [alema@ing.unrc.edu.ar](mailto:alema@ing.unrc.edu.ar)

**RESUMEN:** En las cocinas solares tipo caja el material de cubierta seleccionado, interviene directamente en la eficiencia del sistema de cocción. En este trabajo se determina la incidencia que tiene la utilización de diferentes materiales de cubierta sobre el comportamiento de estas cocinas. Se diseñaron y construyeron dos cocinas solares gemelas tipo caja, las cuales fueron ensayadas utilizando diferentes materiales para las cubiertas. Las experiencias se realizaron de acuerdo a un diseño aleatorizado por bloques incompleto. La variable de respuesta seleccionada fue el primer factor de mérito  $F_1$ , calculado de acuerdo a lo propuesto en el protocolo de la RICSA (Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos). Los datos obtenidos se estudiaron utilizando técnicas de análisis de varianza, determinándose que el material de la cubierta tiene importante incidencia en el comportamiento de la cocina solar. Se realizaron también pruebas de contraste que permitieron establecer comparativamente la aptitud de los diferentes materiales transparentes.

**Palabras clave:** cocina solar tipo caja, cubiertas transparentes, diseño por bloques aleatorizados.

### INTRODUCCION

Existe en la humanidad un gran interés por buscar formas alternativas a las energías convencionales. Esto justifica el desarrollo e investigación de las cocinas solares. En este contexto, nos centraremos en el estudio de cocinas que aprovechan la energía solar como fuente energética, la cual es convertida a energía térmica. Cabe mencionar que estas cocinas evitan, mediante su uso, el consumo de una cantidad importante de leña por año y su uso masivo, podría transformarse en una fuente de ahorro de energía y recursos naturales.

Las cocinas solares pueden clasificarse en tres grupos. Un grupo lo forman las cocinas tipo concentrador, las cuales tienen geometría generalmente parabólica, permitiendo concentrar la radiación solar en su foco donde se coloca el recipiente de cocción. Otro grupo lo forman aquellas cocinas solares que usan un colector separado de la caja para cocinar, el cual contiene un fluido que transporta la energía y muchas veces tienen un sistema de almacenamiento de calor, como por ejemplo, un tanque de aceite caliente. El tercer grupo lo constituyen las cocinas tipo caja las cuales dependen del efecto invernadero combinado con efectos de concentración.

Las cocinas tipo caja han sido desarrolladas en numerosos países debido a su bajo costo y fácil manejo y su comportamiento de muchos factores, entre los que podemos nombrar: los agentes climáticos, la aislación, las características de la superficie absorbedora, el tipo de cubierta transparente, parámetros operacionales vinculados a las características del alimento a ser cocinado, el recipiente de cocción, etc. Luego, una de las tareas críticas al desarrollar una cocina solar es identificar la conveniencia de los materiales a utilizar entre los cuales se encuentran los de la cubierta. Estos deben ser adecuados desde el punto de vista térmico y si es posible de bajo costo.

En el afán de mejorar el comportamiento de la cocina solar tipo caja, existen antecedentes de investigaciones sobre testeo de materiales reflectantes (Harrison, J., 2001), (Saravia et al, 2000), geometrías de reflectores (El-Sebaï A., 1997), y evaluaciones generales del comportamiento de cocinas solares tipo caja de diferentes características (Stoll et al., 1999), (Passamai et al., 2002).

La intención del presente trabajo es contribuir al testeo de distintos materiales transparentes cuando son usados como material de la cubierta de cocinas solares tipo caja.

El estudio se realizó sobre cuatro tipos de materiales transparentes, doble vidrio, vidrio simple, acrílico y policarbonato, utilizando dos cocinas solares tipo caja idénticas, sobre las cuales se realizaron las experiencias.

Se utilizó un diseño por bloques incompletos completamente aleatorizado. La variable de respuesta seleccionada fue el primer factor de mérito  $F_1$ , calculado de acuerdo al protocolo de ensayos propuesto por RICSA (Red Iberoamericana de Cocción solar de Alimentos) (Castel et al, 2000).

Se analizaron los datos obtenidos utilizando técnicas de análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples a los efectos de determinar la relevancia que los diferentes materiales transparentes presentan en el comportamiento de la cocina solar (Montgomery, D. C, 1991). Los resultados se presentan en gráficos y tablas.

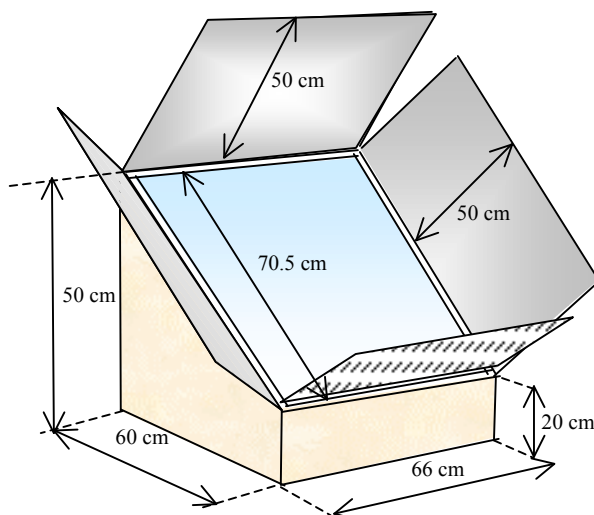
El análisis de estos resultados permite inferir acerca del efecto que produce la utilización de diferentes cubiertas, como así también la incidencia que tuviera el haber realizado los ensayos en diferentes días sobre el factor de mérito  $F_1$  que fue la variable de respuesta seleccionada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Descripción del sistema físico ensayado*

El sistema físico ensayado está constituido por dos cocinas solares gemelas tipo caja. Las mismas están formadas básicamente por una caja de chapa metálica no regular pintada de negro mate que actúa como superficie colectora y está contenida dentro de una estructura realizada en madera liviana (fibrofácil de 5 mm de espesor). Entre la superficie colectora y la estructura de madera se colocó a modo de aislante fibra de vidrio de 5 cm de espesor. La superficie transparente está inclinada  $60^\circ$  respecto a la vertical y admite diferentes materiales de cubierta doble vidrio, vidrio simple, policarbonato y acrílico, los cuales se fijan con sellador de siliconas. Para aumentar la cantidad de radiación captada se dispusieron cuatro reflectores contruïdos en cartón de alta densidad recubiertos con papel metalizado. El acceso al recipiente de cocción se realiza a través de una puerta ubicada en la parte posterior o trasera de la cocina, permitiendo acceder a la olla de manera satisfactoria. Para su mejor desplazamiento y orientación hacia el sol, posee rueditas en su base.

La geometría y dimensiones de las cocinas solares contruïdas se presentan en la figura 1, y en la figura 2 se muestra una fotografía de una de ellas.



*Figura 1 Dimensiones del prototipo de las cocinas solares contruïdas*



*Figura 2 Fotografía del prototipo de las cocinas solares contruïdas*

### Características de los ensayos

El día anterior al comienzo de los ensayos se determinó la superficie proyectada sobre el plano horizontal midiendo la sombra de la cocina con los reflectores abiertos en la posición óptima en el mediodía solar. El área proyectada horizontal  $A_{ph}$  resultante fue de 1,2 m<sup>2</sup>. Se realizó también un cálculo de la carga (Castel et al, 2000), determinándose un valor de 7,5 litros de agua.

Existen varios tipos de pruebas y métodos utilizados para evaluar las cocinas solares, uno de ellos es el primer factor de mérito  $F_1$  (Castel et al., 2002), el cual se interpreta como la relación entre la eficiencia óptica de la cocina y las pérdidas de calor al exterior desde la placa y se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_1 = \frac{A_p (T_p - T_a)}{A_{ph} I_h} \left[ \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

siendo

- $A_p$ : área de la placa absorbente [m<sup>2</sup>]
- $A_{ph}$ : área de la superficie proyectada sobre el plano horizontal [m<sup>2</sup>]
- $I_h$ : radiación solar global sobre la superficie horizontal [W/m<sup>2</sup>]
- $T_p$ : temperatura de la placa [°C]
- $T_a$ : temperatura ambiente [°C]

Podrían existir dudas con respecto al momento en el cual determinar el primer factor de mérito, ya que normalmente, la temperatura se va estabilizando muy despacio y al variar las condiciones de temperatura, radiación solar y velocidad de viento, esto hace que no se perciba nítidamente cual sería este momento. Sin embargo, como el valor de  $F_1$  crece a medida que aumenta la temperatura de placa, cuando se alcanza el equilibrio el valor de  $F_1$  se mantiene prácticamente constante, luego, en este trabajo, se utilizó un valor promediado en el tiempo durante la última media hora del ensayo.

Durante cada ensayo, se registraron numerosas variables. Las temperaturas fueron registradas mediante dos termómetros digitales con dos entradas cada uno, (TES RS 232 datalogger) provistos de termocuplas tipo K. Se midieron la temperatura ambiente, del agua en la olla, del fondo de la superficie absorbidora y del ambiente en el interior de la cocina. Las mismas se registraron en forma automática y se volcaron en un ordenador con un software específico de la marca de los termómetros.

Las variables climáticas se registraron mediante una estación meteorológica automática, que registra temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc. mientras que la radiación solar incidente sobre superficie horizontal se registró mediante dos solarímetros fotovoltaicos conectados a un sistema de adquisición de datos.

### Diseño estadístico de las experiencias y tratamiento de los datos

Con la finalidad de poder determinar si existe evidencia experimental acerca de un comportamiento dispar entre las diferentes cubiertas, y considerando que se disponía solamente de dos cocinas para realizar las experiencias, sobre las cuatro cubiertas, se seleccionó un diseño de experiencias por bloques incompletos. Además, como las comparaciones entre todos los tratamientos tenían la misma importancia se optó por un diseño balanceado. Así, los ensayos se realizaron de acuerdo a un modelo balanceado por bloques incompletos completamente aleatorizados (BIB).

De acuerdo a este diseño se realizaron un total de 24 experiencias en 12 días. Las cuatro cubiertas ensayadas constituyen los tratamientos y los diferentes días, los bloques. Se realizaron dos experiencias por bloque que corresponden al ensayo de las dos cocinas en un día. La elección de los tratamientos por bloque fue totalmente aleatoria.

En la tabla 1, se muestra el diseño BIB realizado, indicando la cocina en la cual se montó cada cubierta.

Tratamientos (cubiertas)	Bloques (días)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Doble vidrio	Cocina 2	Cocina 2	Cocina 2				Cocina 1	Cocina 1	Cocina 1			
Vidrio Simple			Cocina 1	Cocina 1	Cocina 1				Cocina 2	Cocina 2	Cocina 2	
Acrílico	Cocina 1			Cocina 2		Cocina 1		Cocina 2		Cocina 1		Cocina 2
Polycarbonato		Cocina 1			Cocina 2	Cocina 2	Cocina 2				Cocina 1	Cocina 1

Tabla 1: Diseño de experiencias propuesto

A partir de los factores de mérito ( $F_1$ ) calculados para cada una de las experiencias, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para los diferentes tratamientos de modo de probar estadísticamente si existe diferencia o no entre las cubiertas ensayadas. Lo que significa probar la hipótesis nula, esto es, que la incidencia de las diferentes cubiertas en el comportamiento de las cocinas solares en todos los casos es igual, contra la hipótesis alternativa general que las cubiertas ensayadas no se comportan en todos los casos de igual manera. Un análisis similar (ANOVA) se realizó para los bloques de modo de determinar si el hecho que los ensayos hubieran sido realizados en diferentes días tenía incidencia en los resultados experimentales.

A los fines de disponer mayor información sobre el comportamiento de las cubiertas se realizó una prueba de múltiple comparación que proporciona nuevos elementos de juicio sobre las cubiertas. El método más utilizado consiste en realizar todas las comparaciones por parejas ( $H_0: \mu_i = \mu_j$ ,  $H_1: \mu_i \neq \mu_j$  con  $i \neq j$ ) de modo de intentar información adicional acerca del comportamiento de las diferentes cubiertas ensayadas. En nuestro caso se realizaron comparaciones por contrastes ortogonales.

Finalmente se realizó también un nuevo análisis de los datos tratándolos en esta oportunidad como un problema univariado. Se construyó una ANOVA balanceada de una vía, y a continuación una nueva prueba de comparaciones múltiples de acuerdo al método de Tukey-Kramer o hsd (Tukey's honestly significant difference criterion.).

## RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla 2, se presenta el valor del primer factor de mérito calculado para cada experiencia, a partir de los datos obtenidos.

Tratamientos (cubiertas)	Bloques (días)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Doble vidrio	0,0863	0,0870	0,0849				0,0837	0,0856	0,0837			
Vidrio Simple			0,0783	0,0813	0,0829				0,0700	0,0791	0,0701	
Acrílico	0,0850			0,0826		0,0790		0,0710		0,0793		0,0827
Polycarbonato		0,0759			0,0866	0,0738	0,0718				0,0827	0,0806

Tabla 2: Primer factor de mérito calculado para cada experiencia

Los resultados del análisis de varianza realizado se presentan en la tabla 3.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Prob>F
Tratamientos*	3.0073.10 <sup>-4</sup>	3	1.0024.10 <sup>-4</sup>	1.6536	0.2455
Bloques*	1.3532. 10 <sup>-4</sup>	11	1.2302.10 <sup>-5</sup>	0.2029	0.9540
Error	5.4575.10 <sup>-4</sup>	9	6.0638.10 <sup>-5</sup>		
Total	0.0011	23			

\*Suma de cuadrados de tratamiento corregida que toma en cuenta los bloques incompletos.

Tabla 3: Análisis de varianza para el diseño BIB

Los resultados obtenidos de esta prueba se muestran en la tabla 4.

Contraste	F	Prob>F
doble vidrio - vidrio simple	27.1718	5.5461.10 <sup>-4</sup>
doble vidrio - acrílico	4.3545	0.00665
doble vidrio - polycarbonato	14.2584	0.0044
vidrio simple - acrílico	9.7712	0.0122
vidrio simple - polycarbonato	2.0639	0.1847
acrílico - polycarbonato	2.8537	0.1254

Tabla 4: Análisis de múltiple comparación por parejas de tratamientos

Los resultados arrojados por el análisis de varianza univariado se detallan en la tabla 5 y en la figura 3 se representan los valores medios de  $F_1$  para cada cubierta.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	Prob>F
Tratamientos*	0.0002	3	6.83204.10 <sup>-5</sup>	1.58	0.2259
Error	0.00087	20	4.32873.10 <sup>-5</sup>		
Total	0.00107	23			

\*Suma de cuadrados de tratamiento corregida que toma en cuenta los bloques incompletos.

Tabla 5: Análisis de varianza univariado

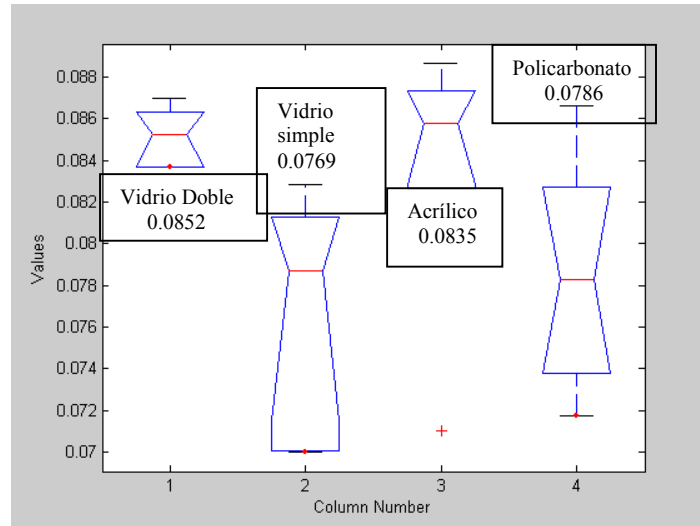


Figura 3. Gráfico de caja representando los valores medios del  $F_1$  de cada cubierta.

Los gráficos siguientes muestran los resultados arrojados por el test *hsd* de las diferentes comparaciones entre cubiertas. Se muestra para cada cubierta su igualdad en comportamiento o no respecto de las otras. La prueba se realizó con un nivel de significación del 5%.

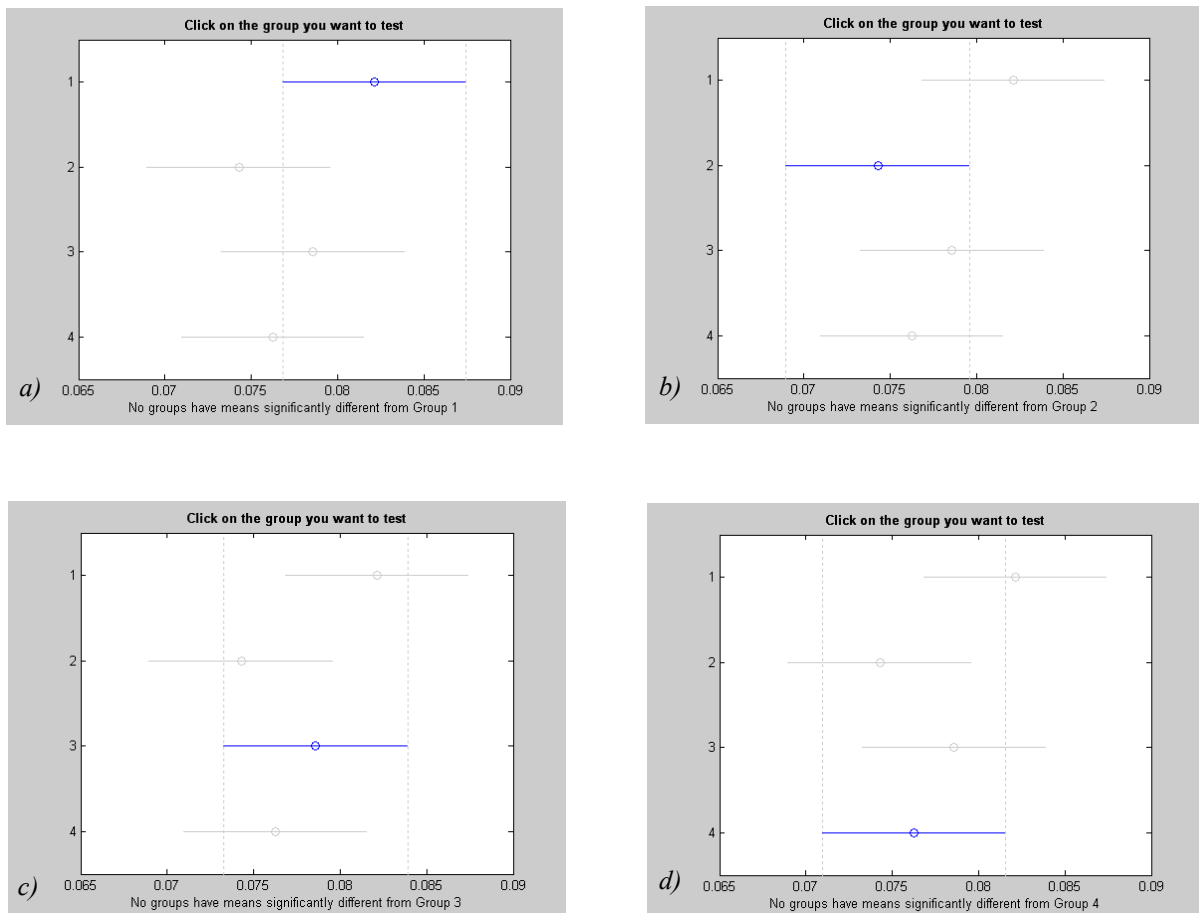


Figura 4. Gráfico de caja representando los valores medios del  $F_1$  de cada cubierta.

a) Doble vidrio   b) Vidrio simple   c) Acrílico   d) Policarbonato

## CONCLUSIONES.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 3, es posible inferir que las cubiertas tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta, esto es el factor de mérito  $F_1$ , indicando que el valor obtenido depende de la cubierta utilizada. Todo lo contrario ocurre con el efecto de los días, estos no tienen incidencia sobre los datos obtenidos, esto es, no afectan los valores observados. Este resultado refuerza el resultado obtenido para los tratamientos, es decir, que al menos una cubierta se comporta de manera distinta a las restantes.

Si consideramos conjuntamente los resultados mostrados en las tablas 3 y 5, vemos que ambos análisis de varianza, tanto el realizado con el tratamiento de los datos según el enfoque BIB como con el enfoque unifactorial, arrojaron resultados idénticos. De aquí, es posible concluir, que las cubiertas muestran un comportamiento diferente.

Para el caso de comparaciones múltiples por contrastes ortogonales realizado de acuerdo al diseño por bloques incompletos (tabla 4) como para test de Tukey de acuerdo al diseño unifactorial (figura 4), podemos concluir que ambos enfoques dieron resultados similares. Podemos inferir en este caso, que las cubiertas de vidrio doble y acrílico muestran un comportamiento diferente de las cubiertas de vidrio simple y policarbonato que parecen comportarse de manera similar. A una conclusión análoga se puede arribar si se observa la figura 3, en que los valores medios encontrados para las cubiertas de vidrio doble y policarbonato presentan un comportamiento algo diferente y superior que las de vidrio simple y acrílico.

Por otro lado y de acuerdo a los resultados encontrados las cubiertas de vidrio doble y policarbonato presentan una mejor performance sobre el funcionamiento de las cocinas que las cubiertas de vidrio simple y acrílico.

De todo lo anterior podemos decir que el factor de mérito utilizado como variable de respuesta en el diseño de experiencias permite inferir acerca del comportamiento de las diferentes cubiertas utilizadas comúnmente en cocinas solares, sin embargo, a los fines de completar este estudio se sugiere seleccionar variables de respuesta alternativas al factor de mérito  $F_1$ .

## REFERENCIAS

- Castel M, Finck Pastrana A., Collares Pereira M., Fonseca S., Esteves A. (2000). Protocolo de cocción solar de RICSA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, N° 1, 03.77-03.80
- El-Sebaï A. A. (1997). Thermal performance of a box-type solar cooker with outer-inner reflectors. Energy. Vol. 22, N°10, 969-978
- Harrison, J., (2001) Investigation of Reflective Materials for the Solar Cooker, Solar Energy Web Site, Florida Solar Energy Center. <http://www.fsec.ucf.edu/Solar/PROJECTS/SolarCooker/reflectivematerialsreport.pdf>.
- Montgomery, D. C. (1991). Diseño y análisis de experimentos, 3ª edición, pp. 155-165. Grupo Editorial Iberoamericana, Belmont, California
- Passamai V. y Passamai M. (2002). Experiencias con cocinas solares tipo cookit de costo mínimo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 6, N° 2, 10.33-10.36
- Stoll, D. et al. (1999). Experiencias controladas realizadas con distintas cocinas solares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, N°2. 3.81-3.84.
- Saravia L. y Suárez H. (2000). Testeo de materiales reflectores para cocinas solares tipo caja. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, 8.75-8.80

## ABSTRACT

In the box type solar cookers the cover material selected takes part directly in the baking system efficiency. In this work the incidence of different cover materials used above the behavior of the cookers is determined. Twin box type solar cookers were designed, constructed, and tested using different materials for the covers. The experiences were made according to a randomized incomplete block design. The answer variable selected was the first merit factor  $F_1$ , calculated according to the protocol proposed by the Latin American Solar Food Baking Network. The collected data were studied using variance analysis, showing that the cover material has an important influence on the behavior of the solar cooker. Contrast tests that allowed us to establish comparatively the aptitude of different transparent materials were also made.

**Palabras clave:** box solar cookers, transparent covers, incomplete blocks design.